

Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con adición de microsílice y nanosílice

H.L. Romero, J.C. Gálvez, I. Lucea y A. Moragues

Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

Con la creciente preocupación por el impacto ambiental de la industria del cemento, el uso de subproductos industriales en la fabricación del cemento y del hormigón ha cobrado gran interés en nuestros días, ya que permiten utilizar estos desechos, reduciendo en muchos casos el consumo de cemento en el hormigón; disminuyendo a su vez el consumo energético y las emisiones asociadas a su producción.

El humo de sílice es un subproducto de la producción de metal silicio o ferrosilicio, su uso como adición en el hormigón ha demostrado ser efectivo en hormigones de alta resistencia. Las partículas de SiO_2 micro y nano, reaccionan con el hidróxido de calcio y la tasa de la reacción puzolánica es proporcional al área disponible para la reacción. Al utilizar nano-partículas, se aumenta el área, mejorando seguramente el desempeño del hormigón. Por lo tanto, resulta de utilidad estudiar el efecto de estas adiciones en el hormigón.

En este trabajo se han estudiado las propiedades mecánicas y la durabilidad de varias mezclas de hormigón autocompactante de alta resistencia con adición de microsílice y nanosílice. Para este propósito se ha incorporado a la mezcla de hormigón microsílice en 3, 6 y 10% y nanosílice en 3 y 6% respectivamente, en peso de cemento. En todas las mezclas se han mantenido constantes el contenido de cemento de 450 kg/m^3 , la relación a/c y la cantidad de aditivo plastificante. Se han realizado ensayos en estado fresco para obtener las características reológicas de los hormigones. Se han determinado las principales propiedades mecánicas a 28 días de edad y se han realizado ensayos de durabilidad. Los resultados de los ensayos muestran una mejora significativa en las propiedades del hormigón. Desde el punto de vista microestructural se observa una estructura porosa más refinada y densa en las mezclas que contienen adiciones, lo cual puede contribuir al mejoramiento de la resistencia y la durabilidad de los hormigones. Las nanopartículas resultaron ser mejores que el microsílice en el aumento de la resistencia.

PALABRAS CLAVE: Nano-sílice, Micro-sílice, Durabilidad.

1.- INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón mejoran, en términos generales, con la adición de microsilíce y nanosilíce [1, 2]. El humo de sílice (SF) es un subproducto de la industria del ferrosilicio. Se trata de un producto puzolánico muy fino, con una gran superficie específica, que añadido al hormigón mejora su resistencia y disminuye su porosidad [3, 4].

Es bien conocido el potencial que la nanotecnología tiene en la mejora de los materiales avanzados de base cemento, facilitando el desarrollo de nuevos materiales, con mejores prestaciones y más sostenibles [5-7]. Las partículas de tamaño nano tienen una gran superficie en relación a su volumen, lo que aumenta su reactividad química. El efecto de la nanosilíce (nS) en morteros y hormigones ha sido estudiado por diferentes autores [8-12], y se ha comprobado que modifica las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones y morteros. La nS mejora la microestructura y actúa como núcleo de reacción en la pasta de cemento, aumentando la velocidad de hidratación, debido a su alta actividad [13-18]. La nS puede contribuir al proceso de generación de geles C-S-H mediante su reacción con la Portlandita (Ca(OH)_2) [9]. Además, las nanopartículas pueden reducir el crecimiento de los cristales de Ca(OH)_2 y AFm, mejorando la resistencia de la pasta de cemento. En este sentido, además mejora la interfase entre la pasta y los áridos [13].

Hay autores que han estudiado las propiedades del hormigón convencional empleando nano-silíce como sustituto parcial del cemento [10, 14], así como en hormigones con ceniza volante [19, 20], y en hormigón autocompactante [21, 22]. En estos estudios se ha observado que la incorporación de nanosilíce mejora la resistencia y la durabilidad [19-22].

Este trabajo presenta los resultados de un estudio sobre la influencia en la resistencia, durabilidad y reología de hormigones autocompactantes que incorporan micro y nanosilíce, en diversas proporciones, y sin la consideración de sustituto parcial del cemento.

2.- CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1.- Materiales empleados

Se empleó cemento Portland UNE-EN 197-1 CEM I 52,5 R. La Tabla 1 muestra la composición química del cemento empleado, así como de la microsilíce (SF) y la nanosilíce (nS). La nanosilíce fue suministrada en disolución acuosa (Levasil 200/40% STW) con un 40% en peso de partículas sólidas.

Se empleó arena (0-4 mm) y grava silíce de río (4-16 mm). El filler utilizado fue calizo. Se empleó un superplastificante de tipo carboxilato en base acuosa (SIKA Viscocrete 5720).

Tabla 1. Composición química potencial y propiedades físicas del cemento, humo de sílice y nanosílice

Constituyente	Cemento	SF	nS
SiO ₂	19.20	95.37	99.90
Al ₂ O ₃	6.07	0.34	
Fe ₂ O ₃	1.70	0.16	
CaO	63.41	0.08	
MgO	2.56	0.04	
SO ₃	3.38	0.15	
K ₂ O	0.82	0.30	
Na ₂ O	0.33	0.18	
Densidad (g/cm ³)	3.15	2.05	1.29
Superficie específica (m ² /g)	0.42	20	200
Diámetro medio (μm)	13.1	142.8	0.015
Pérdida al fuego (%)	2.09	2.70	0.10

Tabla 2. Dosificación del hormigón

Material (kg/m ³)	Designación de la mezcla								
	Control	SF-3	SF-6	SF-10	nS-3	nS-6	SF-3/nS-3	SF-3/nS-6	SF-6/nS-3
Cemento	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Humo de sílice		13.5	27	45			13.5	13.5	27
Nano-sílice					13.5	27	13.5	27	13.5
Agua	171	171	171	171	171	171	171	191.5	171
a/c	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Filler calizo	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Arena	1066	1066	1066	1066	1066	1066	1066	1066	1066
Grava	583	583	583	583	583	583	583	583	583
SPlastificante	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	9.0	9.5	11.1	9.9

2.2.- Dosificación de los hormigones

Se prepararon y ensayaron 9 mezclas de hormigón. Se empleó humo de sílice y nS como adición (dosificada en peso de cemento), no como sustituto del cemento. Una mezcla sin adiciones (mezcla de control), tres mezclas con cemento y humo de sílice (3, 6 y 9% de peso de cemento), dos mezclas con cemento y nS (3 y 6% de peso de cemento) y tres mezclas con cemento y una combinación de humos de sílice y nS (3-3, 3-6 y 6-3% de peso de cemento, respectivamente). El contenido cemento de todas las mezclas fue 450 kg/m³ y la relación agua/cemento 0,38. El contenido de áridos y filler caliza fue fijo en todas las mezclas. Las proporciones en peso de las mezclas se presentan en la Tabla 2.

La secuencia de mezcla en todas las amasadas consistió en homogeneizar los áridos y materiales en polvo (cemento y humo de sílice) durante 2 minutos en la hormigonera y luego se añadió aproximadamente el 70% de agua. A continuación se añadió la nS.

Después se añadió, mezclado en agua, el aditivo superplastificante. El tiempo total de amasado, incluyendo la homogeneización del árido, fue de 5 minutos.

2.3.- Procedimientos de ensayo

El hormigón autocompactable se caracterizó en estado fresco mediante los ensayos de escurrimiento, embudo en V y caja en L, de acuerdo a las recomendaciones de EFNARC [23]. Se hormigonaron probetas cilíndricas de 100 x 200 mm y 150 x 300 mm, así como prismas de 150 x 150 x 70 mm, destinados a los ensayos de resistencia y durabilidad. Todas las probetas fueron hormigonadas en una sola tongada sin compactación. Se desmoldaron a las 24 horas, permaneciendo en cámara de curado hasta el momento de su ensayo.

Propiedades mecánicas: Se midió la resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de acuerdo a la norma UNE-EN-12930-3. La resistencia a tracción se midió a 28 y 90 días siguiendo la norma UNE-EN-12930-6. El módulo de elasticidad se midió de acuerdo a la norma UNE-83316.

Ensayos de durabilidad:

- a) *Permeabilidad:* Generalmente, a menor permeabilidad mayor durabilidad del hormigón. Se midió a los 56 días en probeta de 150 x 300 mm, de acuerdo a UNE-EN-12390-8.
- b) *Migración de cloruros:* Se midió de acuerdo a la norma NT BUILD 492 [24], con probeta de 100 x 50 mm, obtenida a partir del corte de una probeta de 100 x 200 mm. Se trata de un ensayo de migración no estacionaria.
- c) *Resistividad eléctrica:* Se trata de un ensayo simple y rápido de realizar. El coeficiente de difusión de cloruros suele ser inverso a la resistividad del hormigón [25]. Se realizó con probetas cilíndricas de 100 x 200 mm a los 56 días de edad, siguiendo la norma UNE 83988-1 [26].
- d) *Resistencia frente a ciclos hielo deshielo:* Se realizó con probetas de 150 x 150 x 70 mm, de acuerdo a la recomendación UNE-CEN/TS 12390-9, que es muy similar a RILEM TC 117-FDC.
- e) *Porosimetría por intrusión de mercurio:* Se realizó con probetas a la edad de 56 días, de acuerdo a la norma ASTM D 4404-84 [27].

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Propiedades en estado fresco

La Tabla 3 muestra los resultados de los ensayos en estado fresco. El diámetro de los ensayos de extensión de flujo de los hormigones con hasta un 6% de adición variaron entre 605 y 670 mm. La incorporación de micro y nanosilíce aumentó la cohesión y redujo la fluidez. El diámetro de la mezcla SF-10 se redujo a 510 mm. En las mezclas nS-6, SF-3/nS-3, SF-3/nS-6 y SF-6/nS-3 fue necesario aumentar el contenido de superplastificante. A pesar de ello, el diámetro de la torta en las mezclas SF-3/nS-6 y SF-6/nS-3 fue de 470-475 mm. Estos resultados confirman que la incorporación de adiciones de elevada superficie específica requiere el uso de mayor cantidad de

superplastificante y/o el aumento de la relación a/c [4, 15]. El aumento del contenido de material cementante ha mejorado las propiedades reológicas [22].

Respecto al ensayo del embudo en V, el tiempo de duración del ensayo se redujo de 10 a 5 segundos al añadir humo de sílice y nanosílice. Visualmente no se apreció segregación ni exudación del hormigón con humo de sílice y/o nanosílice.

El coeficiente de bloqueo de la caja en L fue de 0,8-0,9 en las mezclas con 3 y 6% de humo de sílice ó 3% de nS. La incorporación de un 9% de adiciones (humo de sílice o nS) condujo a valores de 0,32-0,48.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de hormigón en estado fresco

Ensayo	Designación de la mezcla								
	Control	SF-3	SF-6	SF-10	nS-3	nS-6	SF-3/nS-3	SF-3/nS-6	SF-6/nS-3
Escurecimiento (mm)	670	660	640	510	640	605	617	470	475
T ₅₀₀ (s)	2,8	3,3	4,5	5,5	5,0	6,3	4,0	-	-
Embudo V (s)	10,0	8,0	7,0	5,0	7,5	5,5	6,0	18,0	7,0
Caja en L H ₂ /H ₁	0,88	0,80	0,84	0,58	0,90	0,44	0,90	0,32	0,48

Tabla 4. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido

Propiedad	Edad	Designación de la mezcla								
		Control	SF-3	SF-6	SF-10	nS-3	nS-6	SF-3/nS-3	SF-3/nS-6	SF-6/nS-3
Resistencia a compresión (MPa)	7d	50.6	55.6	60.6	48.4			55.0	60.4	57.4
	28d	54.1	65.1	69.9	67.1	58.7	62.2	64.8	66.8	67.4
	90d	54.3	66.8		71.1	61.4	66.3			
Resistencia a tracción (MPa)	28d	5.12	5.55	5.82	5.39	5.89	5.90	5.85	5.89	5.66
	90d	5.25	6.09							
Módulo de elasticidad (GPa)	28d	30.2	30.0	29.6	28.8	28.7	26.5	28.3	30.4	27.9

3.2.- Propiedades mecánicas del hormigón

La Tabla 4 muestra la resistencia del hormigón a distintas edades. La Tabla 5 muestra los valores relativos de la resistencia a compresión del hormigón respecto a la mezcla de control a la edad de 28 días. La incorporación de la adiciones mejora la resistencia entre un 9 y un 29% respecto al hormigón de control. El incremento de resistencia es mayor en los hormigones con humo de sílice que con nanosílice. La resistencia a tracción también aumenta con la incorporación de las adiciones, aunque en menor medida que la resistencia a compresión (5 a 15%). Algunos autores han observado mejor comportamiento con la adición de nanosílice que con humo de sílice [10, 14, 21, 22].

Los módulos de elasticidad son ligeramente inferiores en los hormigones con las adiciones que sin ellas. Este aspecto se puede deber al incremento del volumen de pasta respecto al hormigón de control.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido (valores relativos al hormigón de control)

Propiedad	Edad	Designación de la mezcla								
		Control	SF-3	SF-6	SF-10	nS-3	nS-6	SF-3/ nS-3	SF-3/ nS-6	SF-6/ nS-3
Resistencia a compresión (MPa)	28d	100	120	129	124	109	115	120	123	125
Resistencia a tracción (MPa)	28d	100	108	113	105	115	115	114	115	111
Módulo de elasticidad (GPa)	28d	100	99	98	95	95	88	94	100	92

3.3.- Resultados de los ensayos de durabilidad

La Figura 1 muestra los resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión. La incorporación de las adiciones reduce la profundidad de la huella dejada por el ensayo. La adición de un 3% y un 6% de nanosílice es más eficiente que la adición de humo de sílice. La combinación de ambas adiciones también reduce la profundidad de penetración de agua. De acuerdo con otros autores [19, 20, 28] la adición de nS mejora la microestructura y reduce la penetración de agua bajo presión.

La Figura 2 muestra el coeficiente de migración de cloruros (D_{nssm}). El valor de D_{nssm} decrece con la incorporación de las adiciones. Aunque no hay un criterio de aceptación o rechazo del hormigón basado en este coeficiente, se puede emplear la siguiente aproximación [29]:

- $D < 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ → Muy buena resistencia a la penetración de cloruros.
- $D < 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ → Buena resistencia a la penetración de cloruros
- $D < 16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ → Moderada resistencia a la penetración de cloruros
- $D > 16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ → No válido para ambientes agresivos

De acuerdo a esta clasificación, el hormigón de control muestra resistencia moderada a la penetración de cloruros. La incorporación de las adiciones permite alcanzar buena resistencia. El empleo de un 10% de humo de sílice y la combinación de 3-6% de nS con humo de sílice conduce a una muy buena resistencia a la penetración de cloruros.

La Figura 3 muestra cómo la resistividad eléctrica también se ve afectada por el uso de las adiciones. La resistividad aumenta con el incremento de la adición. El empleo de un 10% de humo de sílice y la combinación de 3-6% de nS con humo de sílice conduce a una alta resistividad.

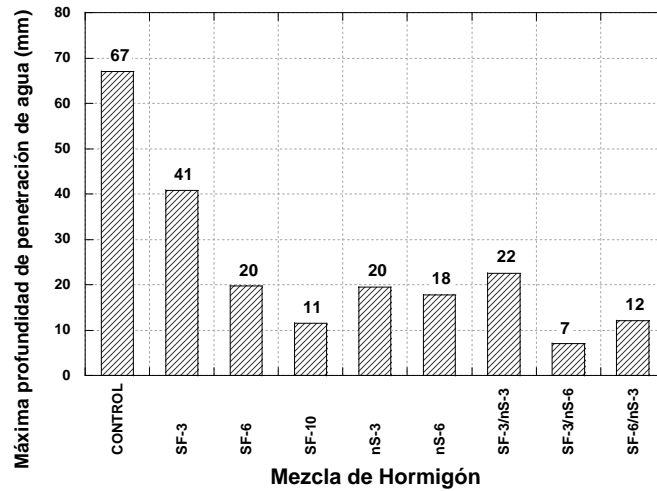


Figura 1. Profundidad de penetración de agua en el ensayo de penetración de agua bajo presión

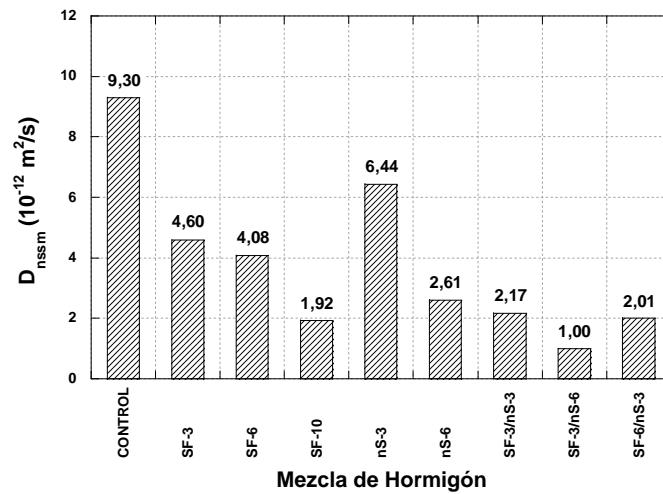


Figura 2. Coeficiente de migración de cloruros

La Tabla 6 muestra la pérdida de masa superficial por unidad de superficie en el ensayo de hielo-deshielo. El hormigón de control y los que contienen un 3% de adiciones (SF-3 y nS-3) fallaron antes de los 28 ciclos. Sin embargo, la adición de un 6% de humo de sílice redujo de forma importante el descascarillado superficial. Los hormigones SF-3/nS-3, SF-3/nS-6 y SF-6/nS-3 también mostraron un buen comportamiento frente a los ciclos hielo deshielo.

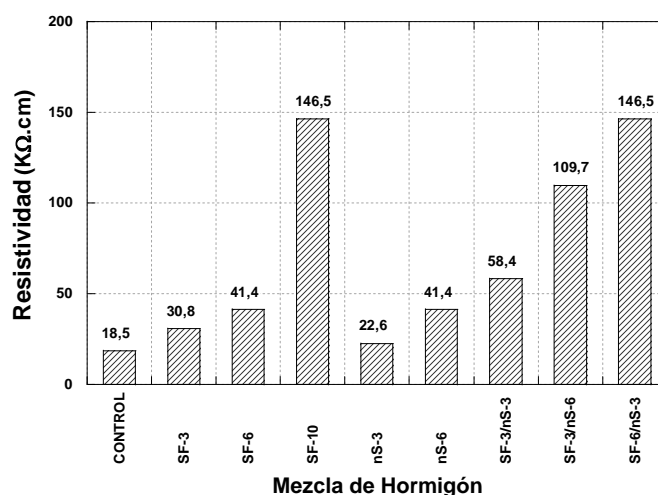


Figura 3. Resistividad eléctrica

Tabla 6. Pérdida de masa por unidad de superficie en el ensayo de resistencia a ciclos hielo deshielo

Designación de la Mezcla	Pérdida de masa acumulada (kg/m ²) Número ciclos H/D		
	6	14	28
CONTROL	0.035	0.285	2.305
SF-3	0.027	0.258	1.644
SF-6	0.048	0.130	0.393
SF-10	0.022	0.084	0.296
nS-3	0.022	0.487	2.288
nS-6	0.085	0.512	1.469
SF-3/nS-3	0.023	0.081	0.335
SF-3/nS-6	0.031	0.052	0.102
SF-6/nS-3	0.032	0.125	0.432

La Figura 4 compara la distribución del tamaño de poro para los hormigones con adiciones. Se puede observar que la nanosílice disminuye el tamaño de poro.

4.- COMENTARIOS FINALES

La adición de humo de sílice y nanosílice al hormigón autocompactante han mejorado su resistencia, siendo la mejora superior en algunos casos con el humo de sílice. Sin embargo, el empleo de nanosílice, combinada en ocasiones con humo de sílice, mejora

las prestaciones del hormigón, en particular su comportamiento en ambientes agresivos. Este aspecto se debe a que el pequeño tamaño de la partícula de nanosílice aumenta mucho su reactividad, incrementando la velocidad de reacción y refinando la microestructura. Desde un punto de vista económico, parece que una combinación de humo de sílice y nanosílice conduce a un óptimo de resistencia y prestaciones del hormigón autocompactante.

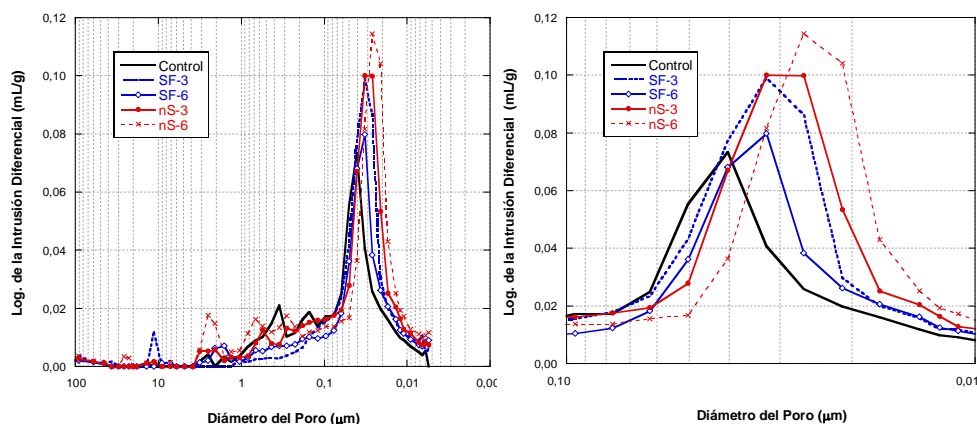


Figura 4. Resultados de la porosimetría de intrusión de mercurio

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la concesión del proyecto PDI2011-24876 e IPT-42000-2010-31.

REFERENCIA

- [1] QING Y, ZENAN Z, DEYU K, RONGSHEN C. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Constr Build Mater* 2007 3;21(3):539-545.
- [2] COLLEPARDI S, BORSOI A, OGOUMAH JJ, TROLI R, COLLEPARDI M, CURSIO AQ. Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC. *Proc. Int. Conf. concrete constructions – innovations and developments in concrete materials and constructions*, Dundee, UK; 5-7 July 2005.
- [3] MALHOTRA V.M., MEHTA P.K.. *Pozzolanic and cementitious materials*, Advances in concrete technology, Ottawa, Canada: Overseas Publishers Association; 1996.
- [4] SIDDIQUE R. *Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. Resources, conservation, and recycling* 2011.
- [5] SOBOLEV K., FLORES I., HERMOSILLO R., AND TORRES-MARTÍNEZ L.M.. *Nanomaterials and Nanotechnology for High-Performance Cement Composites*. SP254-07 2008;254:93-120.
- [6] SCRIVENER KL. *Nanotechnology and Cementitious Materials*. *Nanotechnology in Construction 3* Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 2009. p. 37-42.
- [7] SCRIVENER KL, KIRKPATRICK RJ. Innovation in use and research on cementitious material. *Cem Concr Res* 2008 2;38(2):128-136.
- [8] QING Y. A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume. *Journal of Wuhan University of Technology* 2006;21(3):153.

- [9] LI H, XIAO H, OU J. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cem Concr Res* 2004 3;34(3):435-438.
- [10] LI H, ZHANG M, OU J. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear* 2006 6/30;260(11-12):1262-1266.
- [11] JO B, KIM C, TAE G, PARK J. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Constr Build Mater* 2007 6;21(6):1351-1355.
- [12] BJÖRNSTRÖM J, MARTINELLI A, MATIC A, BÖRJESSON L, PANAS I. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters* 2004 7/1;392(1-3):242-248.
- [13] LI H, XIAO H, YUAN J, OU J. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering* 2004 3;35(2):185-189.
- [14] NAZARI A, RIAHI S. Splitting tensile strength of concrete using ground granulated blast furnace slag and SiO₂ nanoparticles as binder. *Energy Build* 2011 4;43(4):864-872.
- [15] SENFF L, LABRINCHA JA, FERREIRA VM, HOTZA D, REPETTE WL. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Constr Build Mater* 2009 7;23(7):2487-2491.
- [16] MITCHELL DRG, HINCZAK I, DAY RA. Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes. *Cem Concr Res* 1998 11;28(11):1571-1584.
- [17] LARBI JA, FRAAY ALA, BIJEN MJM. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems. *Cem Concr Res* 1990 7;20(4):506-516.
- [18] VAGELIS G. P. Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. *Cem Concr Res* 1999 1;29(1):79-86.
- [19] TAO J. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cem Concr Res* 2005 10;35(10):1943-1947.
- [20] GENG Ying L. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cem Concr Res* 2004 6;34(6):1043-1049.
- [21] NAZARI A, RIAHI S. Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A* 2010 11/15;527(29-30):7663-7672.
- [22] JALAL M, MANSOURI E, SHARIFIPOUR M, POULADKHAN AR. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. *Mater Des* 2012 2;34(0):389-400.
- [23] EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. ; 2005.
- [24] NT BUILD 492. Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments. Finland: Nordtest Method 492; 1999.
- [25] RAMEZANIANPOUR AA, PILVAR A, MAHDIKHANI M, MOODI F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Constr Build Mater* 2011 5; 25(5):2472-2479.
- [26] UNE 83988-1. Concrete Durability - Test Methods - Determination Of The Electrical Resistivity - Part 1: Direct Test (Reference Method). Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR); 2008.
- [27] ASTM D4404. *Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry.* : American Society for Testing Materials (ASTM); 2004.
- [28] QUERCIA G. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. 8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark 2010.
- [29] TANG L. Chloride transport in concrete — Measurement and predictions. Gothenburg, Sweden: Doctoral thesis, Publication P-96:6, Dept. of Building Materials, Chalmers University of Technology; 1996.